

基于 PLC 的水电现地控制单元 硬件架构与软件实现

陈博川

(中国长江电力股份有限公司葛洲坝水利发电厂, 湖北 宜昌 443002)

摘要 现地控制单元(LCU)是水电厂监控系统的核心,直接决定机组运行的稳定性与智能化水平。PLC凭借高抗干扰性、强实时性和模块化扩展优势,成为水电现地控制单元的主流控制器件。本文结合水电厂现场运行需求,系统阐述基于PLC的现地控制单元硬件架构设计、软件程序实现及关键技术优化要点,分析硬件选型、组网架构、逻辑编程和故障处理的核心思路,并通过工程实践验证该架构的实用性。结果表明,该设计可适配水电厂复杂工业环境,实现机组启停、工况调节、故障预警的全流程自动化控制,为水电监控系统升级改造提供技术参考。

关键词 PLC; 水电厂; 现地控制单元; 硬件架构

中图分类号: TV736

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.010

0 引言

水电厂现地控制单元是连接主控与现场设备的关键枢纽。针对传统设备存在的集成度低、实时性差等问题,本文基于可编程逻辑控制器(PLC)设计了一套硬件架构,并开发了配套的控制与通信程序,实现对水轮机、发电机等设备的一体化控制。经工程验证,该系统稳定可靠,可为水电现地控制的标准化和智能化提供可行方案。

1 基于 PLC 的水电现地控制单元整体设计要求

现地控制单元设计需严格遵循水电工业控制行业标准,兼顾实时性、可靠性、扩展性、易维护性四大核心要求:实时性要求毫秒级完成信号采集、数据处理与指令下发,保障关键操作无延时;可靠性要求硬件冗余设计、软件故障自诊断,杜绝单点故障;扩展性要求硬件模块化、软件分层编程,适配不同机组改造升级;易维护性要求硬件标准化接口、软件逻辑清晰,降低现场检修成本。系统需兼容 IEC 61850、Modbus TCP/IP、Profibus-DP 等主流通信协议,实现与电厂主控系统、励磁系统、继电保护装置的无缝通信,确保数据共享与指令协同^[1]。

2 基于 PLC 的水电现地控制单元硬件架构设计

硬件架构采用 PLC 主站、分布式 I/O 从站、冗余组网形式,以西门子 S7-400H 冗余 PLC 为核心,搭配远程 I/O 模块、通信模块、现场测控箱等设备,围绕

核心控制、信号采集、通信交互、现场执行四大功能模块设计,兼顾控制性能与运行可靠性。

2.1 核心控制模块

核心控制模块采用西门子 S7-400H 双机热备 PLC,包含 2 个 CPU417H 冗余主站、冗余电源模块及背板总线。双机热备实现主备 CPU 实时数据同步,故障切换时间小于 10 ms,杜绝核心单点故障。CPU 模块负责逻辑运算、数据处理与指令下发,内置高速运算芯片满足实时性要求,同时支持多协议通信;电源模块输入 AC220V、输出 DC24V,具备过压、过流、短路保护,适应现场复杂供电环境^[2]。

2.2 信号采集与输入输出模块

分为本地 I/O 模块与分布式远程 I/O 模块,适配现场分散测控点布局。本地 I/O 模块直接挂载 PLC 背板总线,选用西门子 SM321/322 数字量模块、SM331/332 模拟量模块,采集屏柜附近关键信号并输出核心控制指令,数字量响应速度 0.1 ms,模拟量采集精度 16 位。分布式远程 I/O 模块采用西门子 ET200M 系列,通过 Profibus-DP 总线与 PLC 主站通信,布置于水轮机层、发电机层等区域,采集温度、压力、油位等现场信号,有效减少电缆敷设量。所有 I/O 模块均具备 2500V 以上光电隔离,抵御电磁干扰,确保信号准确。

2.3 通信模块

采用多协议多接口设计,配置 CP443-1 工业以太网模块、CP441-2 串口模块、Profibus-DP 模块,兼容

作者简介: 陈博川(1991-),男,本科,工程师,研究方向:水电自动化。

IEC 61850 协议，构建现地通信网与上位通信网。现地通信网通过 Profibus-DP 连接远程 I/O 站、调速器、励磁装置，通过 Modbus RTU 连接智能仪表，通过 IEC 61850 GOOSE 网实现保护信号高速传输；上位通信网通过工业以太网连接电厂主控系统，采用 Modbus TCP/IP 实现数据双向传输，支持现地结合远程双重控制。所有通信接口均配置双路链路，避免通信中断^[3]。

2.4 现场测控与执行模块

由现场测控箱与执行设备组成，直接面向现场机组设备。测控箱按布局布置于发电机层、上导、水轮机层等区域，内置远程 I/O 模块、信号隔离器、浪涌保护器，防护等级 IP65，完成现场信号初步采集与隔离；执行设备包括断路器、调速器执行机构、阀门、泵组等，接收 PLC 控制指令完成现场操作，同时通过内置传感器反馈运行状态，形成闭环控制。

2.5 人机交互模块

采用西门子 TP1200 触摸屏作为现地操作终端，与 PLC 通过工业以太网通信，实时显示机组运行参数、设备状态、故障信息，支持手动/自动模式切换、机组启停、参数设置、故障复位等操作，界面简洁直观，满足现场工作人员操作需求^[4]。

3 基于 PLC 的水电现地控制单元软件实现

软件设计采用西门子 STEP 7 V5.6 编程软件，遵循 IEC 61131-3 标准，采用结构化文本 (ST) 与梯形图 (LD) 混合编程，复杂逻辑用 ST 编写，开关量控制用 LD 编写。程序采用分层模块化设计，分为主程序、数据采集模块、控制逻辑模块、通信模块、故障处理模块、人机交互模块，各模块独立编程、相互调用，便于调试与扩展 (见表 1)。

3.1 主程序设计

主程序是软件系统入口，负责程序初始化、模块调度与数据交互，运行流程为：系统上电初始化→硬件自检→通信链路建立→模块参数配置→循环调用子程序→数据上传与指令接收。系统上电后先完成硬件与

通信自检，故障时立即报警；自检通过后进入 100 ms 周期的循环扫描，依次调用各子程序，完成信号采集、逻辑运算与指令下发，实现机组实时控制。

3.2 数据采集模块

数据采集模块负责现场模拟量、数字量信号的采集、处理与有效性判断，为控制逻辑提供可靠数据，分为模拟量与数字量采集子程序。模拟量采集针对转速、电压、温度等信号，经硬件滤波、中值滤波与滑动平均滤波消除干扰，通过标度变换转换为工程物理量，无效数据采用历史有效值替代；数字量采集针对断路器状态、阀门开关等信号，经 10 ms 防抖处理消除触点抖动，连续 3 次采集状态一致方判定为有效。所有有效数据存储于 PLC 实时数据区，实时同步至人机界面与主控系统。

3.3 控制逻辑模块

控制逻辑模块是软件核心，实现机组启停控制、工况调节、辅控设备控制，采用模块化设计，各子程序相互连锁。机组启停控制支持手动/自动模式，自动启动按辅控启动→调速器开阀→机组升速→励磁投运→准同期并网流程执行，自动停机按减负荷→解列→励磁退出→调速器关阀→辅控停止流程执行，故障时立即终止流程并触发保护；工况调节通过 PID 闭环算法实现有功/无功功率精准调节，有功功率调节调速器导叶开度，无功功率调节励磁电流，调节精度 ±0.5%；辅控设备控制根据机组状态自动完成油泵、水泵等设备启停与连锁，如压油槽油位过低时自动启动补油泵，故障时启动备用设备^[5]。

3.4 通信模块

通信模块可实现 PLC 与各设备、系统的双向通信，开发 Modbus TCP/IP、Modbus RTU、Profibus-DP、IEC 61850 GOOSE 等协议的通信子程序，采用数据帧校验与重传机制确保数据准确，接收端校验错误时立即请求重传。模块具备通信链路自诊断功能，链路中断时及时报警并尝试重连，保障通信连续。

表 1 核心软件模块及功能

软件模块	核心功能
主程序	系统初始化、模块调度、循环扫描、数据交互
数据采集模块	模拟量/数字量信号采集、滤波、有效性判断
控制逻辑模块	机组启停、工况调节、辅控设备自动化控制
通信模块	多协议通信、数据帧校验、链路故障自诊断
故障处理模块	故障分级诊断、自动处理、故障信息记录与报警
人机交互模块	界面组态、参数设置、状态显示、现场手动操作

3.5 故障处理模块

实现故障自诊断、自报警、自处理,分为设备故障与系统故障处理子程序。设备故障按轻微、一般、严重分级处理:轻微故障仅报警,一般故障报警并启动备用设备,严重故障立即触发紧急停机、解列等保护动作;系统故障针对PLC硬件、I/O模块等自身故障,实现故障模块无扰切换,如I/O模块故障时切换至备用模块。模块同时具备故障记录功能,存储故障类型、位置、时间等信息,存储时间不少于1年,便于故障分析。

3.6 人机交互模块

采用WinCC flexible组态软件设计界面,分为主监控、参数设置、故障报警、手动操作、历史数据五大界面。主监控界面实时显示机组核心参数与设备状态;参数设置界面支持运行参数与保护定值修改,具备权限管理;故障报警界面声光提醒当前故障,提供处理措施;手动操作界面支持设备点动控制,便于调试;历史数据界面可查询参数历史曲线与数据,支持时间与参数类型筛选。

4 关键技术优化与工程实践

4.1 关键技术优化

为提升系统性能与可靠性,针对现场控制难点,从以下三个方面进行优化:

1. 全系统冗余,硬件层面实现PLC、电源、通信的冗余,软件层面实现程序与数据存储冗余,杜绝单点故障。

2. 双重抗干扰,硬件采用光电隔离、浪涌保护、铠装屏蔽电缆,软件采用组合滤波与防抖处理,消除电磁干扰。

3. 实时性优化,采用程序优先级调度与数据分优先级传输,关键程序与数据设置最高优先级,同时优化程序逻辑,缩短循环扫描周期。

4.2 工程实践

将本设计应用于某2×50 MW中型水电厂现地控制单元改造工程,该厂原有系统为传统继电器控制,存在控制精度低、维护成本高等问题。改造工程于2025年3月实施,完成两台机组现地控制单元的硬件搭建与软件调试,随后进行6个月现场试运行。

试运行结果表明:系统运行稳定,硬件无故障,软件无逻辑错误,实现机组全流程自动化控制;功率调节精度达±0.5%,满足设计要求;故障响应及时,模拟机组超速故障时,50 ms内触发紧急停机保护;与

主控系统通信无延迟、无丢包,实现现地与远程双重控制。改造后,现场工作人员减少50%,设备维护成本降低60%,机组年平均运行时间提升至8 760小时,无因现地控制单元故障导致的停机事故,取得良好的经济效益与社会效益,验证了本设计的实用性与稳定性。

5 结论

本文设计的基于PLC的水电现地控制单元,通过PLC主站、分布式I/O从站、冗余组网的硬件架构,结合分层模块化的软件程序,实现了水电机组的自动化、精细化控制,主要结论如下:硬件架构采用全冗余与抗干扰设计,可有效适配水电厂复杂现场环境,杜绝单点故障,提升系统可靠性与环境适应性;分层模块化软件程序实现了数据采集、控制逻辑、故障处理的全流程自动化,逻辑清晰、扩展性强,满足机组全工况控制需求;关键技术优化进一步提升了系统实时性与稳定性,工程实践验证该设计可大幅提升水电厂现地控制智能化水平,降低运行与维护成本。未来,随着水电智能化建设的深入,基于PLC的现地控制单元将向智能化、网络化、一体化方向发展;引入人工智能与大数据技术,增加机组运行状态预测模块,实现故障提前预警;基于IEC 61850标准构建水电厂工业互联网,实现各系统、设备的深度互联与数据共享;融合机组状态监测、设备寿命管理、智能检修功能,打造一体化现地控制体系,进一步提升水电厂智能化运行水平。基于PLC的现地控制单元作为水电自动化系统的核心,其技术升级对推动水电智能化建设具有重要意义,需结合现场需求,不断融入新技术、新方法,为水电厂安全、稳定、高效运行提供更可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 向强铭,张文韬,夏国强,等.安全可信PLC在水电站监控系统中的应用[J].水电站机电技术,2023,46(12):4-6.
- [2] 王健,杨俊杰,刘刚.基于IEC 61850的水电厂主辅控一体化监控系统设计[J].水电能源科学,2022,40(05):186-189.
- [3] 李建辉,张立军,王鹏.自主可控PLC在水电厂现地控制单元改造中的应用[J].水利水电技术,2024,55(03):158-165.
- [4] 赵鑫,孟繁欣,周明.水电厂LCU系统网络安全防护策略研究[J].电测与仪表,2022,59(20):98-104.
- [5] 陈曦,方芳,吴斌.DL/T 578-2021实施下水电厂LCU升级改造关键技术[J].水电站设计,2025,41(01):76-80.